

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

FOWT (*Floating Offshore Wind Turbine*) telah menjadi fokus utama dalam pengembangan energi terbarukan, terutama di perairan yang dalam di seluruh dunia. Dengan perkembangan teknologi dan meningkatnya kesadaran akan pentingnya keberlanjutan lingkungan, pengembangan *floating wind turbine* terus berlanjut dengan tujuan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mendorong pertumbuhan sektor energi terbarukan global.

Aliran angin yang berhembus di atas permukaan laut lebih stabil dan lebih besar bila dibandingkan hembusan angin di darat. Sudah seharusnya pembangkit listrik tenaga angin di tempatkan di laut. *Floating wind turbine* merupakan salah satu terobosan teknologi terbarukan yang lebih praktis dan ekonomis sebagai pembangkit tenaga angin lepas pantai, baik untuk laut dalam maupun laut menengah. Analisa respon dinamik diperlukan untuk menjaga integritas struktur (Karimirad, 2011).

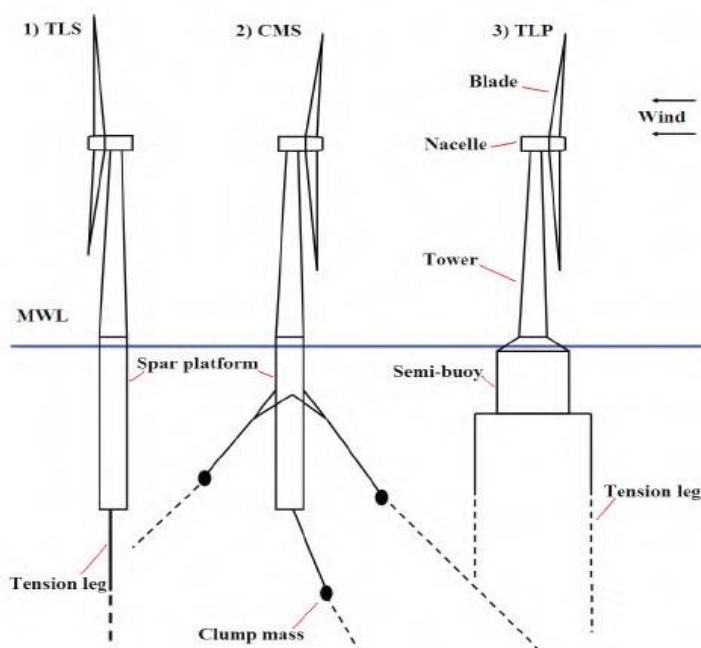
SPAR (*Spar Point Anchor Reservoir*) adalah jenis anjungan lepas pantai terapung yang bersifat lentur yang biasanya digunakan untuk proses pengeboran, produksi, pemrosesan, maupun penyimpanan minyak dan gas alam pada perairan dalam (Kurian, et al., 2012). Jika dibandingkan dengan platform lainnya, penggunaan SPAR pada perairan dalam lebih ekonomis dan efisien untuk pengeboran, produksi, proses, dan sebagai penyimpanan (Islam, et al., 2012). SPAR merupakan jenis *floating structure* yang dapat digunakan di laut dalam dan menjadi struktur yang efektif dan dapat diandalkan dari segi konstruksi. SPAR memiliki ciri khas dengan letak titik *buoyancy* (KB) berada di atas titik gravitasi (KG) sehingga memberikan stabilitas yang baik (Assidiq, et al., 2023).

Konsep stabilitas SPAR berasal dari titik pusat massa (*center of gravity*) struktur yang berada di bawah titik pusat *buoyancy* (*center of buoyancy*). Selain itu, SPAR memiliki *waterplane area* yang kecil sehingga mengurangi efek dari gaya gelombang yang terjadi dan cocok untuk beroperasi di *rough seas* (Sinpyo et al, 2015). Tujuan penggunaan sistem tambat adalah untuk menjaga struktur terapung tetap pada posisi yang direncanakan. Biasanya tali tambat berupa *heavy chain*, *steel wire rope* dan/atau *synthetic polyester ropes* yang dihubungkan ke jangkar di dasar laut (Stendal, 2015).

Sistem *mooring* pada SPAR merupakan mekanisme yang digunakan untuk menjaga posisi dan stabilitas *platform*. Tali tambat dirancang untuk menahan beban dari semua arah dan meminimalkan gerakan *platform* dalam enam derajat kebebasan. Pemilihan tipe *mooring*, konfigurasi *mooring lines*, jenis jangkar, dan material yang digunakan berkontribusi terhadap kemampuan sistem untuk menahan posisi dan mengurangi gerakan akibat beban lingkungan. Analisis statik dan dinamis, serta optimasi desain dan validasi melalui pengujian, merupakan langkah-langkah penting untuk memastikan keandalan dan efisiensi sistem tambat dalam mendukung stabilitas SPAR FOWT.

Berdasarkan pengalaman pada bangunan anjungan minyak dan gas lepas pantai, *floating wind turbine* memiliki struktur pondasi dan sistem pertambatan yang berbeda-beda. Konsep struktur *floating wind turbine* yang tepat untuk laut dalam adalah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Konsep sistem pertambatan dengan *catenary* atau

taut memanfaatkan *ballast system* yang berada dibawah struktur SPAR untuk menopang stabilitas struktur. *Tension leg platform* menerima stabilitas melalui penggunaan sistem tendon pada *platform*. Sedangkan konsep *Tension Leg Spar* adalah campuran dari kedua konsep tersebut, sehingga memanfaatkan keuntungan dari kedua konsep tersebut, sehingga memanfaatkan keuntungan dari konsep keduanya (Karimirad, 2011).



Gambar 1. Jenis-jenis struktur *floating wind turbine* (Karimirad, 2011)

Sistem tambat merupakan komponen penting yang memastikan SPAR tetap stabil dan berada di lokasi yang ditentukan. Dua parameter yang harus dianalisis untuk memahami performa sistem *mooring* pada SPAR adalah respon gerakan dan tegangan (*tension*) pada *mooring line*. Respon gerakan merujuk pada bagaimana SPAR bergerak sebagai reaksi terhadap berbagai gaya eksternal seperti angin, gelombang, dan arus laut. Sedangkan, tegangan (*tension*) *mooring line* merujuk pada gaya yang bekerja pada tali tambat yang menghubungkan SPAR ke dasar laut.

Anastasia (2008) melakukan analisa gerakan SPAR sebagai struktur pendukung anjungan minyak lepas pantai secara numerik dengan menggunakan dua jenis sistem tambat yang berbeda, yaitu sistem tambat *taut* dan sistem *catenary*. Analisa respon gerakan dan respon *tension* yang terjadi perlu dilakukan, agar dapat diketahui apakah struktur tersebut sudah layak untuk kondisi lapangan. Sehingga baik gerakan ataupun respon *tension* yang terjadi akibat beban gelombang tidak akan berakibat pada operasional struktur (Anastasia, 2008).

Pada penelitian Ramadan (2024) bertujuan untuk mengkaji pengaruh jumlah *swing plate* dan ukuran *bulb* terhadap respon dinamis SPAR *wind floater*. Pemodelan melibatkan penambahan diameter (*bulb*) di atas dan bawah *swing plate* dengan variasi ukuran sesuai jumlah *swing plate*. Hasil analisis numerik menunjukkan bahwa penambahan

swing plate dan *bulb* secara signifikan meningkatkan redaman: *surge* hingga 85,5% (model 3 *swing plate*), *heave* hingga 57,7% (model 5 *swing plate*), dan *pitch* hingga 94,1% (model 3 *swing plate*). Peningkatan ini menunjukkan bahwa *swing plate* dan *bulb* di lunas SPAR efektif dalam menambah redaman, dengan konfigurasi jumlah ganjil memberikan hasil redaman yang lebih baik dibandingkan jumlah genap.

Dalam konteks penerapan sistem *mooring*, penelitian tugas akhir ini menggunakan model SPAR dengan jumlah *swing plate* yang ganjil dan melakukan kajian lebih lanjut untuk menentukan keunggulan antara sistem tambat *catenary* dan sistem tambat *taut* yang dikenai beban gelombang *irregular* dengan melakukan analisa respon gerakan dan respon *tension*. Kedua sistem tambat ini memiliki keterbatasan yang perlu dipertimbangkan dalam penggunaannya di lapangan. Eksperimen variasi tali tambat ini dilakukan untuk memahami pengaruh konfigurasi tali terhadap respon gerak model SPAR dalam tiga derajat kebebasan gerakan (*surge*, *heave*, dan *pitch*) serta respon *tension mooring line* maksimum yang terjadi dengan analisa *frequency domain*, dimana untuk analisa numeris menggunakan perangkat lunak ANSYS AQWA.

Martinez et al. (2020) melakukan analisis numerik dan eksperimental untuk membandingkan respon gerak dan tegangan pada sistem *catenary* dan *taut mooring*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun sistem *taut mooring* lebih stabil dalam kondisi gelombang tinggi, jenis *catenary* lebih baik dalam menahan gaya akibat arus yang kuat, karena distribusi bebannya lebih merata di sepanjang tali tambat.

Banyak peneliti telah melakukan studi terkait tentang konfigurasi tambat untuk SPAR FOWT menekankan pentingnya faktor-faktor lingkungan, seperti kecepatan angin, tinggi gelombang, dan arus laut. Faktor-faktor tersebut sangat memengaruhi stabilitas sistem tambat, beban struktural yang diterima, serta pemilihan antara sistem tambat *taut* dan *catenary*.

Dapat disimpulkan bahwa baik sistem tambat tipe *catenary* maupun *taut mooring* memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing, bergantung pada kondisi lingkungan dan kebutuhan stabilitas *platform* FOWT. Penelitian ini akan memperluas pemahaman mengenai bagaimana kedua sistem tambat tersebut mempengaruhi respon gerak dan kekuatan tali pada platform SPAR FOWT dalam berbagai kondisi laut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas, penulis melakukan penelitian ini untuk mengidentifikasi permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini, diantaranya:

1. Bagaimana perilaku gerak SPAR dengan menggunakan *swing plate* antara *catenary mooring* dan *taut mooring* pada gelombang *irregular*?
2. Bagaimana perbedaan kekuatan tali tambat tipe *catenary mooring* dan *taut mooring* pada SPAR dalam kondisi gelombang *irregular*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu:

1. Memperoleh perilaku gerak SPAR menggunakan *swing plate* antara kondisi *catenary mooring* dan *taut mooring* pada gelombang *irregular*.
2. Memperoleh perbedaan kekuatan tali tambat antara *catenary mooring* dan *taut mooring* dalam kondisi gelombang *irregular*.

1.4 Manfaat Penelitian

Beberapa manfaat dari penelitian ini yaitu:

1. Mengetahui perilaku gerak SPAR menggunakan *swing plate* antara *catenary* dan *taut mooring*.
2. Mengetahui perbedaan kekuatan tali tambat antara *catenary mooring* dan *taut mooring system* dalam kondisi gelombang *irregular*.

1.5 Ruang Lingkup

Dalam penelitian tugas akhir ini, terdapat berbagai aspek yang tidak dapat dijelajahi secara mendalam. Oleh karena itu, untuk mengklarifikasi ruang lingkup penelitian dan memastikan fokus yang tepat, diperlukan batasan-batasan berikut ini:

1. Data struktur SPAR yang digunakan, diambil dari tugas akhir M. Fajar Fitra Ramadan, 2024 "Pengaruh Jumlah *Swing Plate* Terhadap Respon Dinamis Spar *Wind Floater* dalam Gelombang Acak".
2. Pemodelan numeris struktur dilakukan dengan menggunakan *software* ANSYS.
3. Tidak memodelkan tower dan rotor turbin angin.
4. Karakter gerakan struktur yang ditinjau adalah *heave*, *surge*, dan *pitch*.
5. *Mooring line* terdiri dari tiga buah dengan posisi yang simetris.
6. Analisa respon gerak menggunakan gelombang *irregular*.
7. Arah beban gelombang yang ditinjau yaitu 0° , 45° , dan 90° .
8. Jangkar dianggap mampu mendukung beban yang bekerja, sehingga tidak dilakukan analisa terhadap daya cengkram jangkar.

1.6 Dasar Teori

1.6.1 Dasar Analisa Dinamis

Analisa dinamis merupakan pendekatan penting untuk mengevaluasi respon sistem tambat dan struktur terapung terhadap beban lingkungan yang berdasarkan API RP 2T (*American Petroleum Institute Recommended Practice Tension Leg Platform*) terdapat dua metode analisa domain didalam melakukan analisa dinamis yaitu:

1. *Time Domain Analysis*

Metode ini umumnya digunakan untuk menganalisa respon struktur terhadap beban sebagai fungsi waktu. Pendekatan yang dilakukan dalam metode ini menggunakan prosedur integrasi waktu dan akan menghasilkan respon *time history* berdasarkan waktu $x(t)$. Kelemahan dari metode ini adalah karena melakukan perhitungan berdasarkan waktu maka membutuhkan waktu yang cukup lama didalam simulasi.

2. *Frequency Domain Analysis*

Metode dengan simulasi pengoperasian pada saat tertentu dengan frekuensi yang sudah ditentukan sebelumnya. *Frequency domain* dapat memperkirakan respon gelombang acak termasuk gerakan *platform*, percepatan, gaya tendon dan sudut. Keuntungannya adalah lebih menghemat waktu perhitungan dan juga input atau output lebih sering digunakan oleh perancang. Namun kekurangan metode ini adalah semua persamaan non-linier harus diubah dalam bentuk linier.

1.6.2 Mooring System

Sistem tambat digunakan untuk menahan posisi struktur terapung, seperti *platform* minyak, FOWT (*Floating Offshore Wind Turbine*), atau kapal agar tetap stabil meskipun terpengaruh oleh gelombang, angin, dan arus laut. Secara garis besar, konfigurasi *mooring line* terdiri dari tiga konsep yaitu sistem *catenary*, *taut leg*, dan *vertical tension leg*.

API RP 2P (*American Petroleum Institute Recommended Practice Platforms*) dan API RP 2SK (*American Petroleum Institute Recommended Practice Stationkeeping*), menyatakan sistem *mooring* menggunakan berbagai jenis tali tambat berdasarkan materialnya, yaitu *chain* (rantai), *wire rope* (kawat baja), dan kombinasi keduanya. *Chain* terbuat dari baja dengan bobot besar, yang unggul dalam menyerap beban dinamis, tahan terhadap kelelahan, dan memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi, sehingga sering digunakan di perairan dangkal hingga menengah meskipun berat dan sulit dipasang. *Wire rope*, yang terbuat dari kawat baja yang dipilin, memiliki kekuatan tarik tinggi, ringan, dan fleksibel, sehingga lebih cocok untuk perairan dalam, meskipun lebih rentan terhadap kelelahan material dan memerlukan perawatan untuk mencegah korosi. Kombinasi *chain* dan *wire rope* memanfaatkan keunggulan keduanya, dengan rantai di bagian bawah untuk mengurangi berat keseluruhan dan meningkatkan fleksibilitas, sehingga ideal untuk aplikasi di perairan dalam yang memerlukan efisiensi dan performa optimal.

1.6.2.1 Catenary Mooring

Menurut buku *Fleet Moorings Basic Criteria Planning Guidelines* (1985) Sistem *catenary* merupakan sistem tambat yang menggunakan tali tambat berbentuk lengkung *catenary* karena beratnya sendiri, sehingga memberikan stabilitas melalui gaya gravitasi. Keuntungan sistem ini yaitu memanfaatkan berat tali tambat untuk menjaga posisi struktur terapung saat menerima beban lingkungan. Namun, kelemahan dari sistem *catenary* adalah gaya tarik vertikal yang rendah, sehingga kurang efektif dalam menjaga stabilitas struktur terhadap resiko *overtuning*.



Gambar 2. Sistem tambat *catenary* (Karimirad,2011)

1.6.2.2 Taut Mooring

Sistem *taut mooring* adalah sistem tambat yang menggunakan tali tambat dengan tegangan tinggi untuk menjaga posisi struktur terapung. Sistem tambat ini cocok untuk perairan dalam karena tidak memerlukan panjang tali yang besar, sehingga lebih hemat ruang. Sistem *taut mooring* adalah memberikan gaya vertikal lebih besar yang membantu menjaga stabilitas struktur terhadap gelombang, angin, dan arus. Namun, kelemahan dari sistem ini cenderung mengalami tegangan yang lebih tinggi tali tambat sehingga membutuhkan material yang tahan terhadap kelelahan.



Gambar 3. Sistem tambat *taut* (<http://www.builtworlds.com/news/2016/1/22/worlds-first-floating-wind-farm-to-surface-off-scottish-coast>) diakses pada tanggal 29 Oktober 2024

1.6.2.3 Tension Leg Mooring

Tension Leg Mooring adalah jenis sistem tambat yang digunakan untuk menjaga posisi struktur terapung di perairan dalam dengan mengandalkan tali tambat yang memiliki tegangan yang sangat tinggi. Sistem ini memberikan stabilitas yang sangat baik terhadap beban eksternal seperti gelombang besar, angin, dan arus, sehingga ideal untuk aplikasi di perairan sangat dalam. Meskipun efektif dalam menahan gerakan dan meningkatkan stabilitas, *tension leg mooring* memiliki biaya instalasi dan pemeliharaan yang tinggi serta tantangan teknis dalam pemasangan jangkar dan material kuat.



Gambar 4. Sistem tambat *tension leg* (Karimirad, 2011)

1.6.3 Beban Aerodinamis dan Hidrodinamika

Pada *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT), gaya aerodinamis dan hidrodinamika menjadi dua beban utama yang mempengaruhi kinerja dan stabilitas struktur di perairan terbuka. Beban aerodinamis berasal dari interaksi angin dengan permukaan struktur di atas air, termasuk turbulensi dan ketidakselarasan angin yang meningkatkan ketidakstabilan terutama pada mode *pitch*. Beban hidrodinamika timbul dari gelombang dan arus laut yang memengaruhi struktur bagian bawah, sering kali lebih dominan pada desain tertentu atau kondisi lingkungan spesifik. Meskipun pada beberapa kasus dan konsep desain tertentu gaya hidrodinamika lebih mendominasi daripada gaya aerodinamis (Karimirad, 2014).

Pada sistem *mooring*, kombinasi beban aerodinamis dan hidrodinamika mempengaruhi tegangan pada *mooring line*. Angin yang kuat tidak hanya cenderung meningkatkan gerakan *pitch*, tetapi juga dapat mempengaruhi gerakan *surge* secara tidak langsung. Sementara gelombang besar dapat meningkatkan gerakan *heave* dan *pitch*. Interaksi beban aerodinamis dan hidrodinamika harus dianalisis secara mendalam agar sistem *mooring* dapat menjaga stabilitas dan menghindari kegagalan akibat kelelahan material atau tegangan berlebih.

1.6.4 Tension pada Mooring Line

Gerakan pada *buoy* karena pengaruh dari gerakan vessel dan pengaruh lingkungan menyebabkan adanya tarikan pada *mooring line*. Tegangan (*tension*) yang terjadi pada tali tambat dapat dibedakan menjadi dua berdasarkan API RP 2P (*American Institute Recommended Practice Platforms*) yaitu:

1. *Mean Tension*, *tension* pada *mooring line* yang berkaitan dengan *mean offset* atau perpindahan rata-rata posisi horizontal struktur terapung dan titik keseimbangannya akibat pengaruh gaya statis lingkungan seperti angin, arus, dan gelombang.
2. *Maximum Tension*, *mean tension* yang mendapat pengaruh dari kombinasi frekuensi gelombang dan *low-frequency tension*.

Tension maksimum pada *mooring line* tersebut dapat ditentukan dengan prosedur di bawah ini:

$$T_{lf\ max} > T_{wf\ max} \text{ maka;} \\ T_{max} = T_{mean} + T_{lf\ max} + T_{wfsig} \quad (1)$$

$$T_{wf\ max} > T_{lf\ max} \text{ maka;} \\ T_{max} = T_{mean} + T_{wf\ max} + T_{lfsig} \quad (2)$$

dimana:

T_{mean} = Mean tension

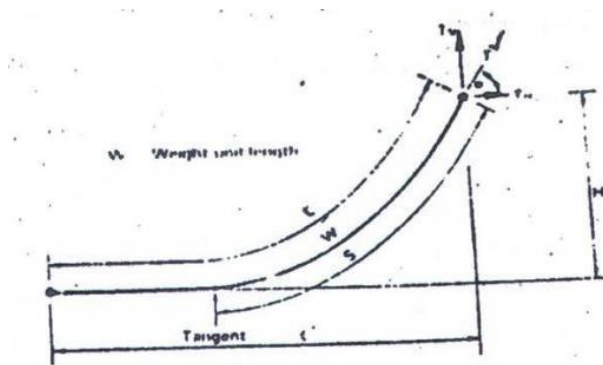
T_{max} = Maximum tension

$T_{wf\ max}$ = Maximum wave frequency tension

T_{wfsig} = Significant wave frequency tension

$T_{lf\ max}$ = Maximum low frequency tension

T_{lfsig} = Significant low frequency tension



Gambar 5. Tension catenary mooring line (WEGEMT)

$$\sum F_z = 0$$

$$F_z = WS = T \sin \theta_B \quad (3)$$

$$\sum F_x = F_x = T_0 \quad (4)$$

$$T = \sqrt{T_0^2 + W^2 S^2} \quad (5)$$

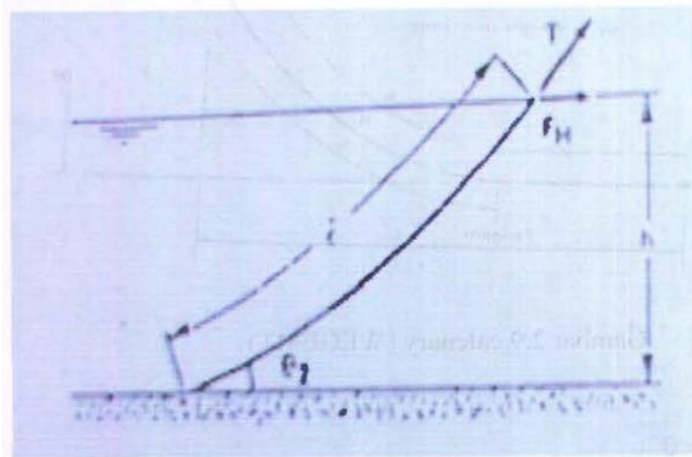
dimana:

W = Berat *mooring* yang tercelup

S = Panjang *mooring line*

T_0 = Pretension dari *mooring line*

T = Tension total



Gambar 6. Tension taut mooring line (Anastasia, 2008)

$$X = 2c \arg \sinh \left(\frac{\sqrt{i^2 - h^2}}{2c} \right) \quad (6)$$

$$Q = \arg \cosh \left(\frac{i}{2c \sinh \left(\frac{x}{2c} \right)} \right) \quad (7)$$

$$e_2 = \arg \tan \left[\sinh \left(Q + \frac{x}{2c} \right) \right] \quad (8)$$

$$T = \frac{F_x}{\cos e_2} \quad (9)$$

$$c = \frac{F_x}{w} \quad (10)$$

dimana:

- X = Panjang *mooring line* horizontal
- i = Panjang total *mooring line*
- h = Tinggi vertikal
- F_x = Komponen gaya horizontal
- e_2 = Sudut akibat posisi *mooring line*
- c = Konstanta *mooring line*
- w = Berat *mooring line* (weight per unit length)

1.6.4.1 Safety Factor

Safety Factor atau faktor keamanan menggunakan *Breaking Strength* (BS) sebagai salah satu parameter dasar untuk menghitung seberapa aman suatu sistem tambat beroperasi di bawah beban yang diterimanya. BS merupakan kapasitas maksimum yang dapat ditahan oleh tali tambat sebelum putus. *Breaking Strength* memberikan batas atas beban atau tegangan yang dapat ditahan sebelum terjadi kegagalan. Untuk mengetahui apakah

tali tambat mampu atau tidak, nilai tegangan pada tiap *mooring line* perlu memenuhi kriteria *safety factor*.

Tegangan yang diperoleh dibandingkan dengan nilai BS untuk memastikan tegangan yang terjadi tidak melebihi kapasitas maksimum tali tambat dengan memperhatikan faktor keamanan (*Safety Factor*). Berdasarkan API RP 2SK nilai BS dapat diperoleh dari formula empiris yaitu:

$$BS = k \times d^2 \quad (11)$$

dimana:

k = Material Constant

d^2 = Equivalent Diameter

Kriteria *safety factor* yang dijadikan sebagai acuan adalah API RP 2SK (*Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures*) dimana telah menetapkan *safety factor* untuk *mooring line* harus lebih besar dari 1,67. Persamaan faktor keamanan menurut API RP 2SK adalah:

$$Safety Factor = \frac{Breaking Strength (BS)}{Maximum Tension} \quad (12)$$

Jika tegangan aktual (*tension*) melebihi nilai desian dengan *safety factor* yang ditetapkan, yang dapat menyebabkan deformasi, kerusakan, atau putusnya tali tambat.

1.6.5 Response Amplitudo Operator (RAO)

Menurut Chakrabarti (1986), *Response Amplitudo Operator* (RAO) merupakan fungsi yang menggambarkan respon gerakan dinamis suatu struktur akibat pengaruh gelombang dengan rentang frekuensi tertentu. Persamaan RAO menurut Chakrabarti adalah sebagai berikut.

$$RAO(\omega) = \frac{X_p(\omega)}{\eta(\omega)} \quad (13)$$

dimana:

$X_p(\omega)$ = Amplitudo struktur

$\eta(\omega)$ = Amplitudo gelombang

1.6.6 Spektrum Gelombang

Dalam menentukan karakteristik perilaku gerakan struktur terapung pada gelombang acak, diperlukan spektrum gelombang yang dapat mewakili kondisi real saat struktur beroperasi. Pemilihan spektrum SPAR pada gelombang acak adalah berdasarkan kondisi real laut yang ditinjau. Dari beberapa jenis spektrum gelombang yang digunakan dalam penelitian ini yaitu *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP). JONSWAP sendiri merupakan perkembangan dari spektrum gelombang *Pierson Morkowitz* yang

disesuaikan dengan kondisi laut yang ada. Berikut merupakan persamaan dari spektrum gelombang JONSWAP.

$$S(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \text{EXP} \left[-1.25 \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^4 \right] \gamma^{\text{EXP} \left[\frac{-(\omega - \omega_0)^2}{2\tau\omega_0^2} \right]} \quad (14)$$

dimana:

$S(\omega)$ = Spektrum gelombang

α = $0.0076 (X_0)^{-0.22}$, untuk X_0 tidak diketahui $\alpha = 0.0081$

g = Percepatan gravitasi (9.81 m/s^2).

ω = Frekuensi angular gelombang ($\omega = 2\pi f$, dimana f yaitu frekuensi gelombang).

ω_0 = Frekuensi puncak gelombang

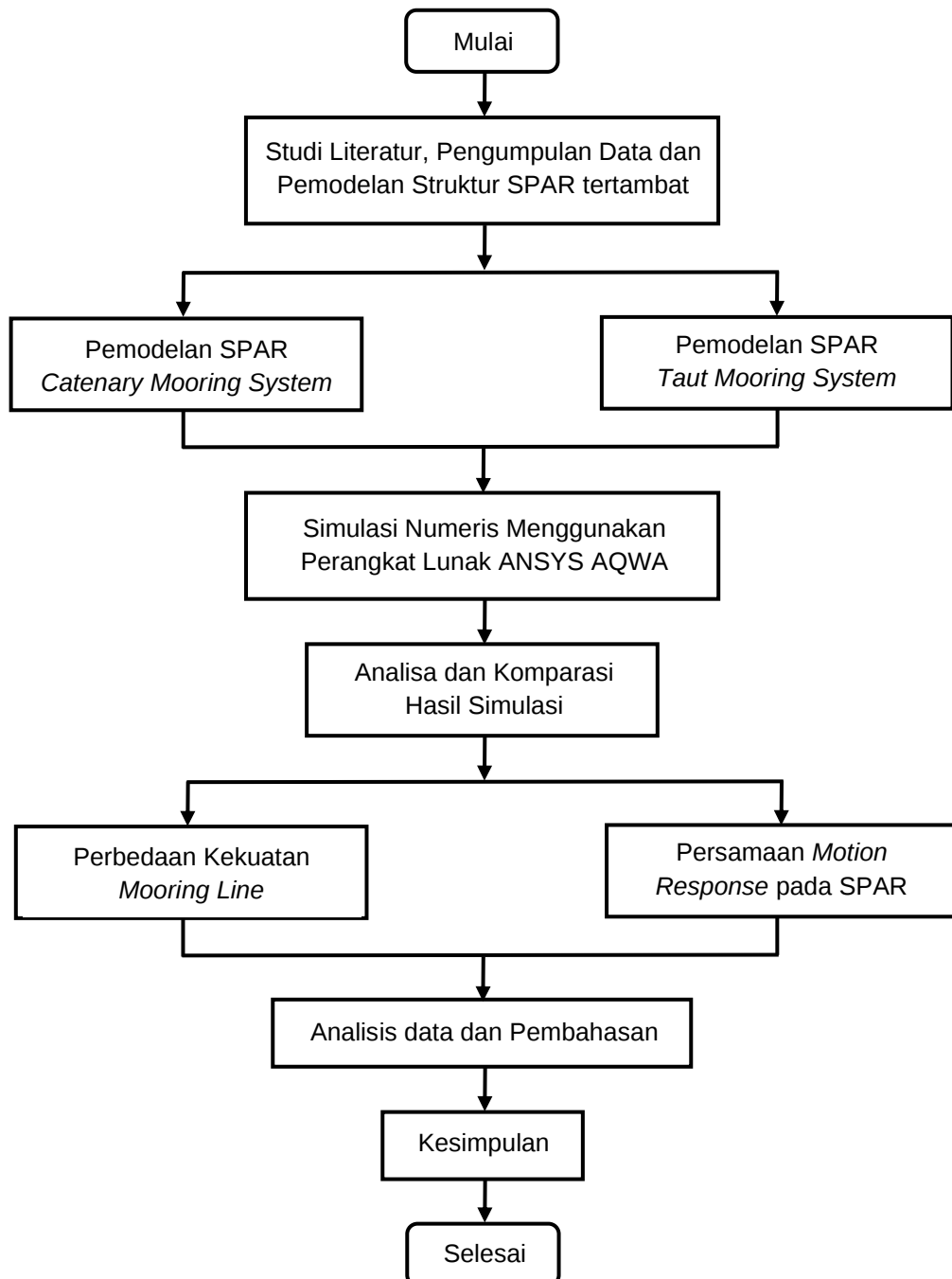
τ = Parameter bentuk atau shape parameter

γ = *Peakedness* parameter, yang harganya dapat bervariasi antara 1 sampai dengan 7, untuk laut Indonesia mempunyai harga 2,5.

BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Diagram Alir

Metode penelitian dilakukan dengan berbagai tahapan dan prosedur, untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada diagram alir berikut:



2.2 Prosedur Penelitian

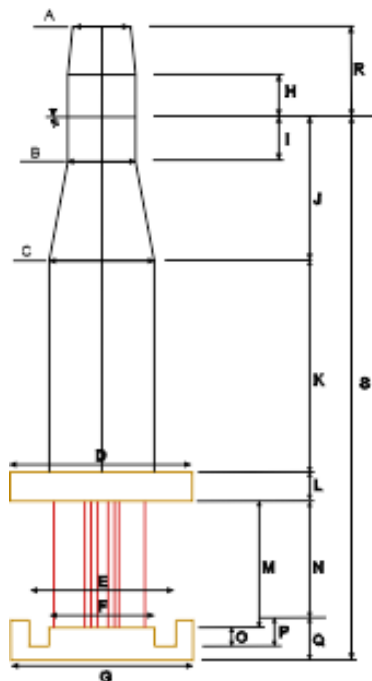
2.2.1 Studi Literatur

Studi literatur ini bertujuan untuk memberikan pemahaman mendalam tentang sistem tambat *catenary mooring* dan *taut mooring* pada struktur *Floating Offshore Wind Turbine* (FOWT) tipe SPAR, khususnya dalam hal respon gerak dan tegangan tali. Penelitian ini sangat penting karena pemilihan sistem tambat yang tepat dapat mempengaruhi stabilitas, keamanan, dan efisiensi operasional FOWT. Selain itu, perlu mengumpulkan data-data untuk pemodelan, baik data struktur SPAR FOWT maupun input beban lingkungan, yang dalam hal ini difokuskan pada beban gelombang saja.

2.2.2 Pengumpulan Data

2.2.2.1 Data struktur SPAR

Data struktur SPAR yang digunakan adalah SPAR 6 MW dari penelitian Zheng et al (2020) dengan penambahan *bulb* dan tiga pelat peredam (*swing plate*) dari penelitian Ramadan (2024).

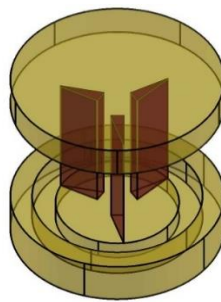


Gambar 7. Model SPAR dengan tambahan *bulb* dan *swing plate*

Tabel 1. Dimensi model SPAR *bulb* dan *swing plate*

Deskripsi	Besaran	Satuan
A	8,0	m
B	9,5	m
C	14,6	m
D	25,277	m
E	20,148	m

Deskripsi	Besaran	Satuan
F	14,605	m
G	25,277	m
H	6,0	m
I	6,0	m
J	20,0	m
K	29,55	m
L	4,150	m
M	17,700	m
N	16,550	m
O	2,530	m
P	3,680	m
Q	5,750	m
R	13,0	m
S	76,0	m



Gambar 8. Detail model *bulb* dan tiga *swing plate*

2.2.2.2 Data *Mooring Line*

Parameter *mooring line* untuk *catenary mooring* dapat dilihat pada Tabel 2. sedangkan, Tabel 3. Menunjukkan parameter untuk *taut mooring*.

Tabel 2. Parameter *catenary section*

Catenary Mooring Section	
Mass / Unit Length	370 kg/m
Number of Mooring Lines	3 lines
Length	400 m
Equivalent Cross	0,09 m ²
Stiffness, EA	800.000.000 N
Maksimum Tension	11.981.000 N
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	2,4
Equivalent Diameter	0,13 m
Longitudinal Drag Coefficient	1,15
Material Constant	0,25 kN/mm ²

Tabel 3. Parameter *taut section*

Taut Mooring Section	
Mass / Unit Length	370 kg/m
Number of Mooring Lines	3 lines
Length	114,5 m
Equivalent Cross	0,09 m ²
Stiffness, EA	800.000.000 N
Maksimum Tension	11.981.000 N
Added Mass Coefficient	1
Transverse Drag Coefficient	2,4
Equivalent Diameter	0,13 m
Longitudinal Drag Coefficient	1,15
Material Constant	0,25 kN/mm ²

2.2.2.3 Data Lingkungan

Data lingkungan yang diperlukan dalam penelitian tugas akhir ini meliputi data angin, arus, dan gelombang. Data yang digunakan pada penelitian tugas ini ada tiga jenis sebaran gelombang yang pertama sebaran gelombang di Selat Makassar (Dinaryo, 2016) dan yang kedua sebaran gelombang berdasarkan regulasi FOWT (*International Electrotechnical Commission* (IEC), 2009). Data lingkungan ini berfungsi untuk mendapatkan gerak respon struktur SPAR pada kondisi tertambat dan mengetahui besaran gaya tarik pada tali tambat.

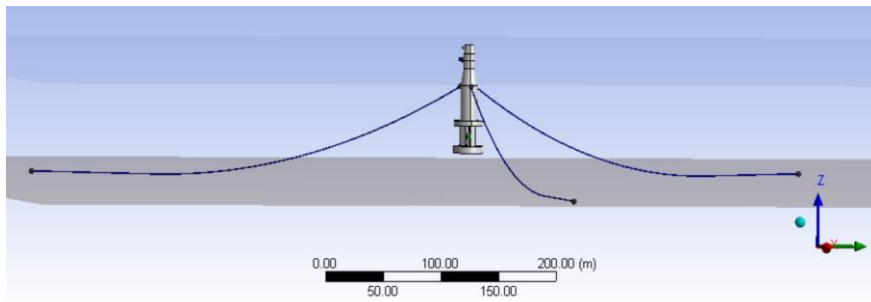
2.2.3 Verifikasi Model SPAR

Data Struktur yang digunakan adalah SPAR 6 MW yang diambil dalam penelitian Zheng et al (2020), kemudian dilakukan penambahan diameter (*bulb*) yang terletak di atas pelat peredam dan di bagian bawah pelat peredam (*swing plate*). Model SPAR dengan tambahan *bulb* dan *swing plate* telah tervalidasi dengan melakukan perbandingan parameter menggunakan perangkat lunak AUTOCAD, MAXSURF, dan ANSYS AQWA pada penelitian Ramadan (2024).

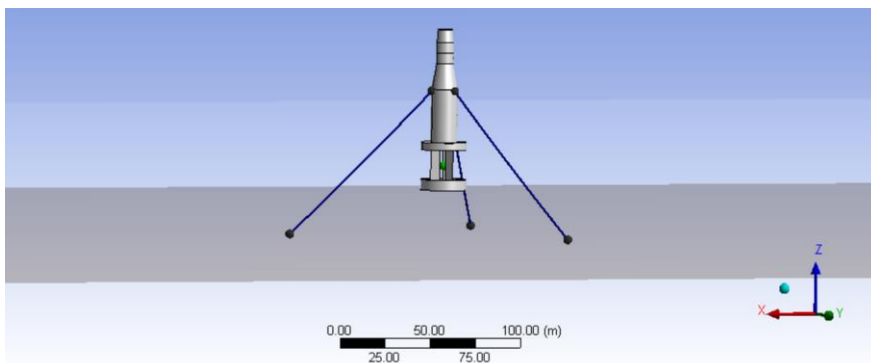
Hasil perbandingan hidrostatik menunjukkan *error* dibawah 2% sesuai standar ABS (*American Bureau of Shipping*), sehingga model dianggap valid. Validasi *volume* dan COG (*Center of Gravity*) dilakukan dengan AUTOCAD dan menunjukkan *error* di bawah 1%, menjadikan model sesuai dan layak digunakan.

2.2.4 Pemodelan SPAR dengan Variasi Sistem Tambat

Tipe sistem tambat yang digunakan adalah *catenary mooring* dan *taut mooring* yang disesuaikan dengan kondisi operasional dan karakteristik perairan. Pemodelan SPAR dengan sistem tambat dilakukan dengan menggunakan ANSYS AQWA.



Gambar 9. Model SPAR dengan sistem tambat *catenary*



Gambar 10. Model SPAR dengan sistem tambat *taut*

2.2.5 Simulasi Numeris

Simulasi numerik merupakan bagian yang penting untuk menganalisis kinerja sistem tambat pada SPAR. Dalam penelitian ini, simulasi bertujuan untuk menganalisis stabilitas, respon gerak, dan tegangan pada *mooring line* akibat pengaruh gaya eksternal seperti angin, gelombang, dan arus pada dua jenis *mooring system* yaitu *catenary mooring* dan *taut mooring*. Perangkat lunak yang digunakan yaitu ANSYS Aqwa.

2.2.6 Analisa dan Komparasi Hasil Simulasi

Membandingkan hasil antara *catenary mooring* dan *taut mooring* serta menganalisis perbedaannya. Komparasi dilakukan untuk menilai bagaimana kedua jenis sistem tambat berbeda dalam hal respon gerak dan tegangan tali, serta untuk menentukan sistem tambat mana yang lebih efektif atau efisien dalam kondisi tertentu.

2.2.7 Analisis dan Pembahasan

Analisis dan pembahasan bertujuan untuk mengevaluasi hasil penelitian yang telah dilakukan untuk membandingkan kinerja sistem tambat *catenary mooring* dan *taut mooring* pada SPAR dalam hal respon gerak dan tegangan tali. Serta membandingkan amplitudo dan frekuensi respon gerak dari komponen gerakan *Surge*, *Heave*, dan *Pitch*

berdasarkan grafik RAO. Kemudian membandingkan tegangan maksimum pada masing-masing *mooring line* dalam kedua sistem tambat.

2.2.8 Kesimpulan dan Saran

Menyimpulkan hasil analisis dan memberikan rekomendasi mengenai sistem tambat yang lebih efisien dan efektif untuk SPAR FOWT berdasarkan respon gerak dan tegangan tali. Serta mengidentifikasi area untuk penelitian lebih lanjut dan pengembangan teknologi. Kekurangan dan saran dari penelitian ini dapat dikemukakan untuk pertimbangan penelitian SPAR FOWT (*Floating Offshore Wind Turbine*) selanjutnya.